

## **CONCENTRADOR DE DISTANCIA FOCAL CORTA PARA COCINAS COMUNALES**

**Luis Saravia, Carlos Cadena, Ricardo Caso, Carlos Fernández**

INENCO

Instituto UNSa-CONICET, Salta, Argentina

saravia@unsa.edu.ar

**y Adolfo Iriarte**

UNCa-CONICET, Catamarca, Argentina

**RESUMEN.-** En trabajos anteriores se ha presentado el diseño, construcción y ensayo de cocinas solares de tamaño grande destinada a abastecer las necesidades de cocinas de escuelas albergues de 100 o más alumnos. Los ensayos realizados muestran que la mejora de algunos aspectos del diseño contribuirá a una mejor aceptación del sistema por parte de los usuarios. Dos son los aspectos de mayor importancia: 1) incrementar el tiempo que es posible operar sin mover el concentrador para que el manejo pueda ser manual; 2) lograr que se pueda acceder al absorbedor desde atrás. De manera que la carga de los distintos tipos de absorbedor sea sencilla no requiriendo esfuerzos mayores por parte de los usuarios. En este trabajo se muestra que estos objetivos pueden lograrse disminuyendo la distancia focal del concentrador desde los 45 cm de los modelos usados anteriormente hasta sólo 15 cm, aumentando el radio de la zona central sin espejo de 40 a 50 cm y cambiando el modo de sujeción y giro del espejo, de manera que la región circular central tenga un fácil acceso. En este trabajo se detallan las consecuencias de esos cambios y se muestra experimentalmente que el concentrador no disminuye sus prestaciones mientras que ahora se lo puede mantener 40 minutos sin girarlo y el acceso al absorbedor desde atrás por el círculo central es ahora muy sencillo.

### **INTRODUCCION**

Saravia et al. (1999, 2004) han presentado en Reuniones pasadas de la ASADES el diseño, construcción y ensayo de cocinas solares de tamaño grande destinada a abastecer las necesidades de cocinas de escuelas albergues de 100 o más alumnos. Los ensayos realizados en condiciones reales de trabajo han mostrado un buen funcionamiento. También se ha visto la necesidad de mejorar su diseño con el fin de que su uso sea más sencillo. Dos son los aspectos de mayor importancia:

1) El movimiento del concentrador para seguir el sol se hacía en forma manual o eléctrica. En el caso eléctrico se tuvieron problemas de confiabilidad mientras que el manual requería cambios frecuentes, en el orden de los 15 minutos, interrumpiendo otras actividades de los encargados.

2) El absorbedor, colocado en el centro del concentrador, resulta incómodo para maniobrar la extracción de sus elementos, ya sea la caldera que se utiliza o las barras de aluminio que almacenan la energía. Esto se agudiza porque la mayoría de los habitantes de la región son de estatura pequeña.

El propósito de este trabajo es presentar un diseño mejorado del concentrador que evite estos problemas. El nuevo diseño y su ensayo experimental son discutidos a continuación.

No se ha encontrado en la bibliografía una discusión detallada en relación con el efecto de la disminución de la distancia focal en los aspectos citados.

### **2.-NUEVO DISEÑO DEL CONCENTRADOR**

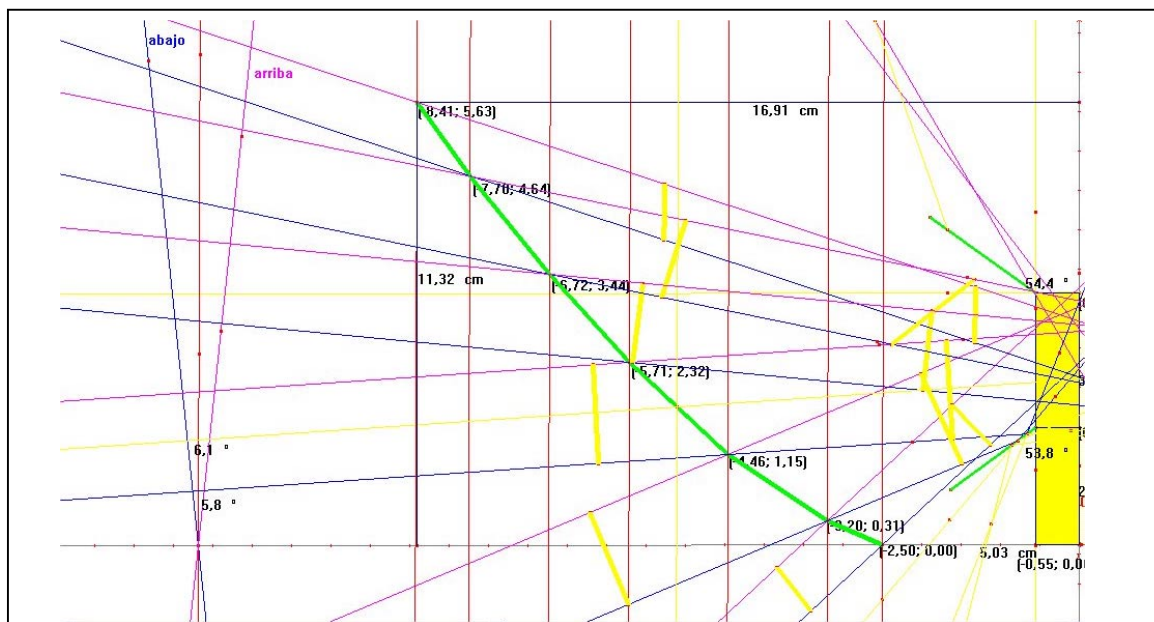
El concentrador utilizado anteriormente tenía una distancia focal, definida como la distancia desde el vértice del espejo hasta el punto del segmento focal más cercano al vértice, de 55 cm. Ello tiene la ventaja potencial de que la superficie de aluminio que se necesita en la construcción es menor porque la curvatura del espejo resulta ser más bien moderada. Como inconveniente resulta que la sensibilidad del seguimiento solar es más sensible, requiriendo ajustes más frecuentes. Se estimó en esta etapa que el aumento de costo es pequeño por lo que sería posible disminuir la distancia focal. Ello haría menor la sensibilidad del seguimiento y si la distancia focal se achica lo suficiente el absorbedor resultaría estar muy cerca del vértice del espejo. Como éste tiene un círculo central de unos 40 cm de diámetro libre de espejo, porque el absorbedor hace sombra en esa zona, será posible llegar al absorbedor desde la parte trasera a través del círculo. En esas condiciones los dos objetivos se verán cumplidos.

El diseño del nuevo espejo se realiza en forma gráfica utilizando el programa Cabri II de Texas Instruments, en el cual se pueden trazar líneas representando la trayectoria de los rayos solares y se puede trazar la misma utilizando las operaciones geométricas de las que dispone el programa.

El propósito es tratar de obtener una forma del espejo que permita obtener el absorbedor iluminado por la mayoría de los rayos que se reflejan en el espejo aunque el mismo esté desviado en el intervalo angular(+5, -5) grados. Esto implica que el concentrador cumplirá con su misión de concentrar los rayos solares en el absorbedor durante un tiempo de traslado del sol de 40 minutos. Se necesitará hacer una corrección de la posición del concentrador cada 40 minutos, lo que se considera suficiente para que no sea necesario la colocación de un seguidor automático. Una corrección manual en esas condiciones no implica un esfuerzo especial para la persona que atiende la cocina solar, ya que la misma debe inspeccionar periódicamente la marcha de la cocción.

El método utilizado para el diseño se ilustra en la figura 1. Está basado en el uso de técnicas de concentración sin formación de imagen basándose en la noción básica de que si se dispone de un concentrador de ese tipo, para determinar la zona iluminada por una cierta porción del espejo, basta encontrar la trayectoria de los rayos que salen a los extremos de cada sección de espejo a estudiar. Todos los otros puntos de la sección iluminarán la zona que queda entre los puntos determinados por los extremos. Nuestro espejo esta formado por conos, por lo que cada cono representado por un segmento verde en la figura 1 iluminará una zona del absorbedor, que se muestra como un rectángulo amarillo. El dibujo esta a escala. Por la forma en que se maneja el Cabri II las medidas no son las reales, si se multiplica por 5 se tiene la medida real en centímetros. Las coordenadas de los puntos que define el espejo se encuentran en decímetros. Como se aprecia el espejo ha resultado tener un diámetro de 169.1 cm y su profundidad es de 56,5 cm, bastante mayor que la del espejo anterior. El absorbedor está completamente colocado dentro del reflector, con su parte posterior a la altura de la circunferencia posterior. Ello implica que se puede manipular sin ningún problema.

Como datos conocidos del concentrador se elije el diámetro del círculo central del espejo, en este caso 50 cm, y se dibuja la posición elegida para el absorbedor, que en este caso es un cilindro de 11 cm de diámetro y 17 cm de longitud. Como se ha comentado en trabajos anteriores, estos valores se obtienen del hecho de que el cilindro de vidrio que rodea al absorbedor está construido con un vaso de precipitado pyrex de 12.5 cm de diámetro y 17 cm de largo. Dentro de él debe entrar el absorbedor, ya sea una caldera o un conjunto de barras de aluminio a calentar. El diámetro del círculo se ha seleccionado como un poco mas grande que antes a los efectos de facilitar el manejo de caldera y barras.



**Fig. 1.- Diseño del espejo por el método de concentración sin formación de imagen. En amarillo el concentrador, en verde el espejo, en rojo los rayos solares incidentes, en azul y en bordó los rayos límites de cada sección cónica del espejo.**

A la izquierda de la figura 1 se marca en rojo el haz solar incidente y en rojo y bordó los límites hasta donde se piensa desviar el haz solar durante el diseño. En este caso, como se indica, están alrededor de 6 grados para cada lado, indicando que el sistema funcionará durante algo más de 40 minutos sin moverse, 20 minutos a un lado del centro y 20 minutos al otro lado.

Se han colocado dos conos espejados en los extremos del vaso de vidrio que actuarán como segundos reflectores cuando sean necesarios. Esto ocurrirá cuando se llegue cerca de los límites del barrido del sol y la mancha de luz sobre el absorbedor intente escapar por las puntas del absorbedor. Allí los rayos se reflejarán por segunda vez y volverán al absorbedor. Esta opción suplementaria al funcionamiento básico permitira alcanzar la meta de funcionamiento estacionario por 40 minutos. Este comportamiento se mostrará en forma experimental en otra sección. Estos conos se ven en la figura 1 como segmentos adosados al absorbedor y se eligió un ángulo con la vertical de 54 grados para de finir el cono. Esto permite un funcionamiento razonable y evita que los conos intercepten los rayos que llegan del espejo directamente.

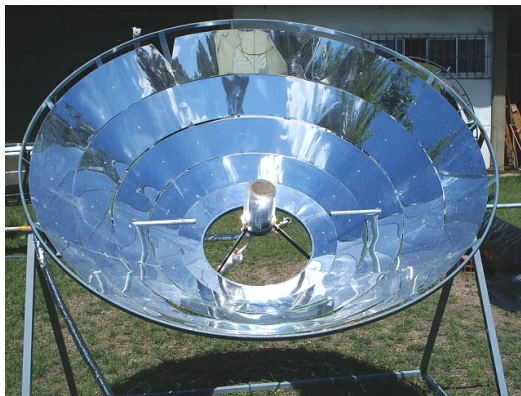
De este dibujo final se extraen las coordenadas de los puntos que fijan las secciones en forma de cono del espejo, que definen los brazos radiales del concentrador. Por otra parte se alimentan al programa Excel ya usado en trabajos anteriores con el cual se calculan los parámetros constructivos de las secciones y los radios de los aros que deben cortarse sobre las láminas de aluminio.

### 3.- LA CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

La figura 2 muestra etapas en la construcción artesanal del concentrador.



*Fig. 2.- Muestra algunas de las etapas constructivas: la estructura soporte con su aro central, sus brazos y, el corte de los aros y la colocación fina de los aros de lámina de aluminio reflejante.*



*Fig. 3.- Muestra el concentrador en una vista frontal calentando una caldera para producción de vapor. La caldera está cerca del fondo y puede ser extraída desde atrás. Se aprecia el soporte del espejo, de tipo horizontal, que no obstaculiza el acceso por la parte trasera. Los caños que entran en el espejo permiten colocar una olla de 10 litros para su calentamiento directo.*

La figura 3 muestra el producto terminado. Con respecto al anterior se ha cambiado el apoyo en el suelo, que ya no tiene un soporte central debido a que ahora se tiene acceso al absorbedor por la parte central desde atrás. El soporte es el clásico, con un montaje horizontal. Un eje horizontal que en su prolongación virtual pasa por el centro del absorbedor, de manera que el peso del mismo no molesten el balanceo y el mismo no se traslade espacialmente. El soporte rotará verticalmente con una rudas adecuadamente orientadas, que no figuran aún en la foto. El soporte está ligeramente balanceado y unos pequeños contrapesos son necesarios en la parte trasera. Con este soporte la corrección del movimiento solar debe hacerse orientando ambos ejes. Esto no molesta ya que las rotaciones se harán en forma manual, no se necesitan dos motores. Como se ve, el absorbedor está sujeto al aro central con tres pequeñas patas ya que ahora está muy cerca de ese aro. Si se quiere poner una olla,

habitualmente se usa una de 10 litros, se coloca una parrilla agarrada al eje central para que mantenga horizontal la olla.

#### 4.- ENSAYO GLOBAL

Ante todo se ha realizado un ensayo global del sistema utilizando como absorbedor el conjunto habitual de 10 barras de aluminio cuyo peso total es de 6.6 kg. Estas barras de 32 cm de largo quedan parcialmente expuestas al sol en el vaso pyrex, con 17 cm de longitud, y el resto sobresale del vaso y está aislado, por lo que se calientan más lentamente por transmisión. Se colocaron 3 termocuplas, una en cada extremo y otra en el centro, de manera que una de ellas es la que está directamente expuesta al sol y se calienta más rápidamente. La Fig. 4 muestra la gráfica de los resultados obtenidos para las tres termocuplas.

La termocupla central da aproximadamente el valor medio de la barra. Usualmente el ciclo de calentamiento en un horno es que el conjunto de barras se coloque en el horno a 300 C y se saque cuando baje hasta los 150 C para colocarlo de nuevo en el colector y se caliente otra vez de 150 a 300 C. Los datos muestran que la temperatura central llega a los 150 C a los 15 minutos y llega a 300 C a los 44 minutos, o sea que se tarda prácticamente media hora. Este comportamiento es muy similar al del modelo anterior cuando se lo va rotando para seguir el sol. Como se aprecia, las barras siguen calentando si se las deja en el concentrador, llegando a 410 en una hora.

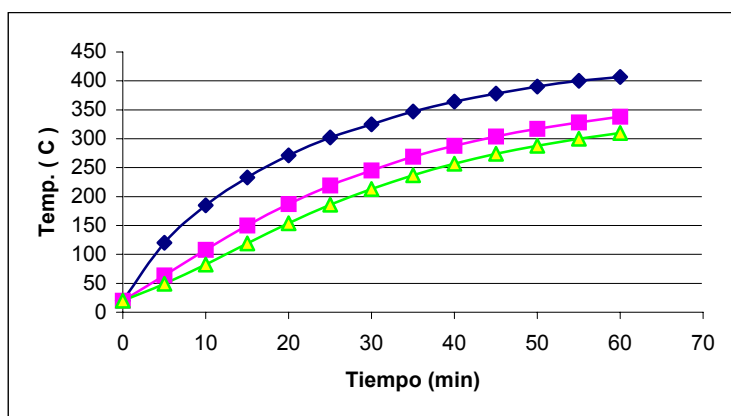


Fig. 4.- Muestra las temperaturas en tres puntos durante el calentamiento de una barra.

Se puede hacer un cálculo de la eficiencia global como la relación entre potencia almacenada en el aluminio y la potencia solar que llega, lo que variará de acuerdo al rango de temperatura que se usa. Si se calcula para el rango de 20 a 106 C, lo que habitualmente se utiliza para el calentamiento de agua, se obtiene una eficiencia medida de 53%, teniendo en cuenta el calor específico del aluminio, su masa y el salto de temperatura. La radiación solar que llega es de prácticamente 1000 vatios por metro cuadrado y el concentrador tiene 2 m<sup>2</sup>. Si el cálculo se realiza entre los 150 y los 300 C, rango habitual para el horneado, la eficiencia medida cae a 25 %, lo que es natural ya que las pérdidas térmicas del absorbedor crecen fuertemente con la temperatura.

Estos resultados son muy similares a los obtenidos con el diseño anterior, indicando que el comportamiento térmico del concentrador no ha sido alterado por las modificaciones introducidas con el nuevo diseño.

#### 5.- COMPROBACION EXPERIMENTAL ANTE EL MOVIMIENTO SOLAR.

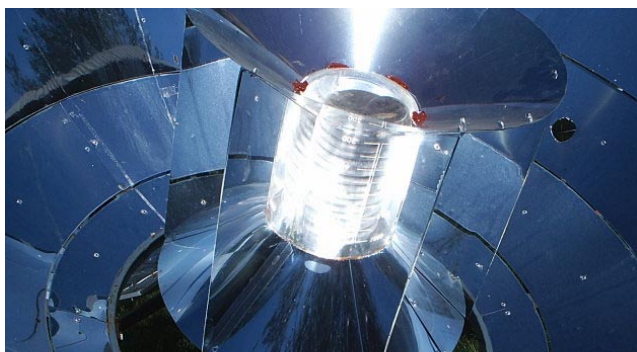
En este caso es importante comprobar hasta que punto el diseño preparado cumple con la condición de tener un buen comportamiento de absorción de la radiación con desvíos de hasta 20 minutos de la posición ideal. El problema radica en que el diseño realizado fue hecho con un programa que trabaja en dos dimensiones. No obstante, si bien esto es suficiente cuando hay simetría axial, es decir, cuando el sol está bien orientado y los rayos siguen la dirección del eje central del colector, no sucede lo mismo cuando el sol se desvía de esa posición, ya que se pierde la simetría axial del sistema. En esas condiciones el comportamiento de las zonas del espejo en que los rayos se mantienen en el plano en el que el sol se corre, que es la posición que se estudia en dos dimensiones, es distinto que el de las zonas en que los rayos se salen de dicho plano. Para los puntos del espejo que, por ejemplo, se encuentran sobre la normal al desplazamiento del sol sucede que los rayos solares que llegan ahí salen del plano solar y alumbran al absorbedor sufriendo un desvío normal al eje del absorbedor, por lo que los conos colocados en los extremos no tienen efecto y el rayo deja de iluminar al absorbedor rápidamente.

Con el fin de apreciar la magnitud del problema, se realizaron medidas bajo condiciones reales de iluminación bajo radiación solar y se midió como la desviación de los rayos al no mover el espejo incidía sobre la energía total recogida por el absorbedor .

Las medidas que se discuten a continuación fueron realizadas en la ciudad de Salta, en día claro sin nubes, con una radiación total normal al plano de incidencia en el orden de los  $1050 \text{ w/m}^2$ .

#### 6.- POTENCIA MEDIA RECOGIDA CON EL CONCENTRADOR.

Las medidas anteriores han mostrado que la potencia media que se recoge en el absorbedor cuando el concentrador está quieto durante un intervalo de tiempo dado caerá algo debido a las pérdidas de radiación ya descritas. Con el fin de evaluar esa caída se ha medido experimentalmente la potencia media recogida para distintos intervalos de tiempo. Se han hecho medidas para intervalos desde 0 a 50 minutos. La técnica utilizada para medir la potencia en forma rápida ha sido la misma que la utilizada inicialmente por Angstrom a comienzos del siglo pasado para medir radiación solar directa. Se ha reemplazado el absorbedor (caldera o barras) por un serpentín por el cual se hace pasar un flujo conocido de agua y se mide el aumento de temperatura del agua entre la salida y la entrada. Se ha diseñado el sistema para que el aumento de temperatura sea pequeño pero suficiente para que sea medido con cierta precisión. Se ha seleccionado un salto de unos  $12 \text{ C}$ , para lo cual se necesita una circulación de agua del orden de  $1 \text{ kg}$  por minuto. Con esto se extrae alrededor de  $1000$  vatios. Ya se ha visto que esa es la potencia que se absorbe en el absorbedor cuando el salto de temperatura con el exterior es bajo, del orden de las decenas de grados. El serpentín se muestra en la figura 5-a. Se usan 4 caños de entrada o salida ya que se usan dos serpentines entrelazados que recorren el absorbedor en sentidos contrarios para uniformizar la temperatura de todo el sistema. La figura 5-b muestra el serpentín en su lugar, listo para la medida. El sistema ha funcionado correctamente permitiendo tomar los datos sobre el comportamiento a distintos ángulos.



*Fig. 5.a. Muestra el serpentín de medida de la potencia absorbida*

*Fig. 5.b. Muestra el serpentín colocado en lugar de la caldera.*

Estos datos entre la posición central y un tiempo dado darán la potencia media recogida en todo el intervalo. Este tiempo deberá duplicarse en la práctica ya que se puede comenzar el barrido solar con colector quieto en la posición extrema opuesta para luego pasar por el centro y llegar a la posición final. Como se aprecia en la figura 6 donde se muestran los resultados para distintos intervalos, hasta los 40 minutos la caída de potencia llega al 12%, lo que se considera aceptable. Estos 40 minutos es un tiempo razonable ya que el cuidador del sistema debe inspeccionar a intervalos regulares la marcha de la cocción. Esto implica que con este sistema se vuelve innecesario el uso de un sistema automático de seguimiento solar.

La figura 5.b muestra los espejos secundarios que han sido ensayados para evitar la pérdida de rayos cuando el haz incidente no está alineado. Los dos conos evitan la salida del haz fuera del absorbedor para las reflexiones sobre las zonas del espejo paralelas al camino del movimiento solar mientras el espejo está quieto. Los espejos planos evitan la pérdida de los rayos reflejados en el espejo primario en las zonas que están a lo largo de la normal al camino del sol.

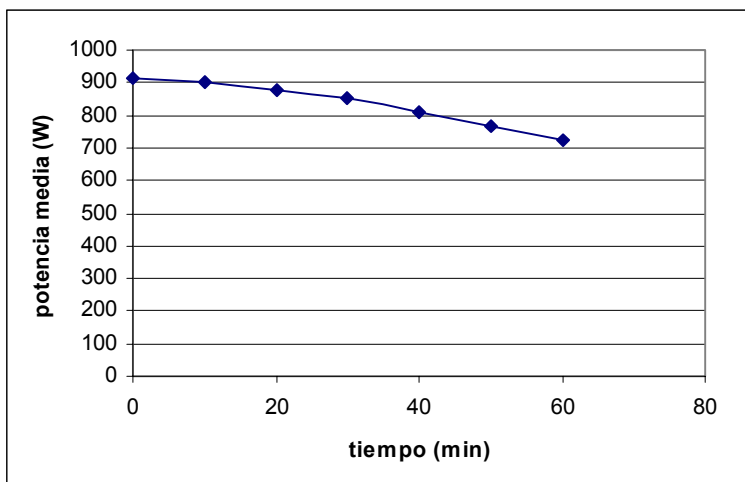
Se han hecho medidas de la absorción de energía por el absorbedor usando el serpentín con tres posibles situaciones: sin ningún espejo secundario, con los conos y con los conos más los espejos planos. El sistema con ambos tipos de espejo muestra una mejora del 10 % en la potencia recogida mientras que el solo uso de los conos da aproximadamente un 5%. Los dos tipos de espejo están unidos formando una

pieza sólida que puede ser puesta o sacada con facilidad, sujetándose a las tres que sostienen el absorbedor.

## 7. CONCLUSIONES

Las experiencias realizadas para evaluar el concentrador al que se ha denominado como “profundo” muestran que se han logrado los objetivos buscados:

1) Ahora el concentrador puede dejarse quieto durante unos 40 minutos sin que se produzca un descenso importante de la potencia recogida. Ya no es necesario usar un seguidor automático, basta con que la persona que lo atiende tenga un contador de tiempo que marque los intervalos de 40 minutos necesarios para atender el equipo. En el caso de usar las barras se puede simultáneamente cambiar las barras y realinear el concentrador.



*Fig. 6.- Muestra la potencia media absorbida cuando el sol recorre todo el intervalo entre la posición central y la posición final desviada, que se indica en minutos de recorrido solar. Cuando se llega a los 20 minutos ( 40 minutos en total si el colector inicia su recorrido en la posición opuesta) la caída de potencia llega al 12%, lo que se considera un límite razonable. No se usó un reflector secundario*

2) El acceso al absorbedor ha sufrido un cambio significativo. Ahora se puede llegar a él sin problemas, siendo muy sencillo cambiar las barras, la caldera o colocar una olla de 10 litros en el foco.

El equipo sigue teniendo las propiedades térmicas ya medidas en otras ocasiones. Trabajando a 100 C, es decir, produciendo vapor de agua, es capaz de producir energía con una eficiencia del 50 % durante unas 8 o 9 horas en forma continuada. Ello implica que cada concentrador es capaz de dar unos 1000 W de potencia. Trabajando a 300 C para hornear, esterilizar u otros usos de alta temperatura, la potencia generada llega a unos 500 W. El equipo es muy versátil, convirtiéndose en un generador térmico de uso múltiple capaz de realizar diversas tareas en forma confiable. Desde el punto de vista económico el equipo es capaz de producir unos 8400 megajulios anuales. Comparándolo con el uso del gas envasado, sobre la base de un costo inicial de US\$ 300 por concentrador, la inversión se recupera en algo más de un año.

## 8. AGRADECIMIENTOS.

El Dr. Saravia es investigador principal del CONICET mientras que C. Cadena y R. Caso forman parte de la carrera de apoyo de la misma Institución.

Este proyecto se ha llevado a cabo con el apoyo financiero del Foncyt , el CIUNSa y el CONICET.

## 9. REFERENCIAS

L.R. Saravia, C. Cadena, R. Caso y C. Fernández. *Cocinas solares comunales con concentrador y acumulador sólido*. Energías Renovables y Medio Ambiente. Revista de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente. Vol. 6, pp. 7-15, Agosto de 1999.

Saravia, L., Franco, J, Cadena, C., Caso, R., Fernández, C., Múltiple use comunal solar cooker, Solar Energy, accepted for publication, 2004.

**ABSTRACT.** In previous articles a communal cooker with a capacity to produce up to 100 kg of food has been introduced. Its use in real conditions has shown that some modifications are necessary to improve the use of the solar cooker in two aspects: 1) to increase the time that the system can be used without any motion of the concentrator, 2) to be able to reach the absorber from behind in such a way that the cooker becomes easier to handle. In this paper it is shown that both aspects can be satisfied decreasing the focal length from 45 cm down to 15 cm, increasing the radius of the central circumference from 40 to 50 cm and changing the concentrator support. The changes are described in detail and it is shown experimentally that they are successful to obtain the described objectives.